

Transiente Vorgänge bei Erdschlüssen in Mittelspannungsnetzen

T. ŁOBOS, Wrocław, Polen

Übersicht: Beim Erdschluß in Netzen mit isoliertem Sternpunkt und induktiver Sternpunktterdung treten transiente Vorgänge auf, die meistens einen schwingenden Charakter haben, da das Netz ein System mit passiven Elementen L und C bildet. In der vorliegenden Arbeit wird eine Analyse dieser Vorgänge in Netzen mit einer größeren Anzahl von Leitungen dargestellt. Aus den theoretischen Überlegungen, der Analyse der Berechnungsergebnisse mittels eines Digitalrechners sowie aus den Untersuchungen bestehender Anlagen geht hervor, daß im transienten Erdschlußvorgang folgende freie Komponenten höherer Frequenz zu unterscheiden sind:

- Entladungskomponenten der geerdeten Phase,
- Nachladungskomponenten der Phasen ohne Erdung,
- Ausgleichskomponenten zwischen den einzelnen Freileitungen und Kabeln der Schaltanlage.

Im Beitrag werden die Abhängigkeiten zur Berechnung der Komponenten sowie der Phasenströme und -spannungen bei Erdschlüssen dargestellt.

Contents: During ground faults in networks with isolated or compensated neutrals appear transient phenomena which are generally found to be of oscillating type. In this paper, the transients for networks with any number of lines are analyzed. Site tests, theoretical analysis and computer studies proved that in earth fault transients the following higher frequency components might be distinguished: discharge of faulty phase components, charge of sound phases components, inter-line compensating components.

In this paper, formulae to calculate components and determine the phase currents and voltages are derived.

Verzeichnis der verwendeten Symbole

C_1, C_0	Kapazitäten für die symmetrischen Mit- und Nullkomponenten
i_a, i_b, i_c	Phasenströme der Phasen ABC
u_a, u_b, u_c	Phasenspannungen der Phasen ABC
i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}	Ströme der einzelnen Phasen des Einspeisetransformators
i_1, i_2, i_0	symmetrische Stromkomponenten
u_1, u_2, u_0	symmetrische Spannungskomponenten
L_1, L_0	Induktivitäten für symmetrische Mit- und Nullkomponenten
L_s	Induktivität des Einspeisesystems
φ	Phasenverschiebung
ψ	Anfangsphase
ω	Kreisfrequenz
ω_T	Kreisfrequenz der Entladungskomponenten
ω_d	Kreisfrequenz der Nachladungskomponenten
ω_{1w}, ω_{0w}	Eigenkreisfrequenzen der Ausgleichskomponenten in Stromkreisen für symmetrische Mit- und Nullkomponenten

1. Einführung

Beim Erdschluß in Netzen mit isoliertem Sternpunkt und mit induktiver Sternpunktterdung bricht die Spannung der erdgeschlossenen Phase bis zu Null bzw. bis zu einem von der Übergangsresistanz bedingten Wert ab. Die Spannungen der gesunden Phasen gegenüber der Erde, unter der Voraussetzung einer vollen Spannungssymmetrie vor dem Erdschluß, betragen im stabilen Zustand höchstens $\sqrt{3}$ der Phasenspannung. Die Spannungsänderungen dürfen nicht plötzlich eintreten, da das Netz ein System mit passiven Elementen L und C bildet. Sie werden von

transienten Vorgängen begleitet, die hauptsächlich einen oszillierenden Charakter haben.

Veröffentlichungen über instabile Erdschlußerscheinungen [1, 3, 6, 7] enthalten keine Abhängigkeiten über alle freien Strom- und Spannungskomponenten. Es sind nur Berechnungsformeln für die Frequenz einiger Komponenten zu verzeichnen, es fehlen auch Beziehungen für die Phasenströme und die Phasenspannungen. Die Betrachtungen werden in diesen Arbeiten anhand eines Schemas vorgenommen, in dem alle Leitungen des Systems durch eine Leitung mit Ersatzparametern ersetzt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird ein vereinfachtes mathematisches Modell für die transienten Erdschlußvorgänge in einem Netz mit beliebiger Anzahl von Leitungen dargestellt. Das Modell wurde auf Grund von theoretischen Erwägungen, Modelluntersuchungen sowie eigener Untersuchungen und die anderer Autoren in natürlichen Verhältnissen erarbeitet.

Eine genaue Kenntnis der transienten Vorgänge ist in der Theorie der Erdschluß-Überspannungen von großer Bedeutung und kann bei den Arbeiten über den Erdschlußschutz Verwendung finden, wo transiente Vorgänge ausgenutzt werden [2, 5].

2. Allgemeine Abhängigkeiten zur Berechnung der transienten Vorgänge bei Erdschlüssen

Anhand des Ersatzschemas für symmetrische Komponenten (Bild 1) werden die Differentialgleichungen

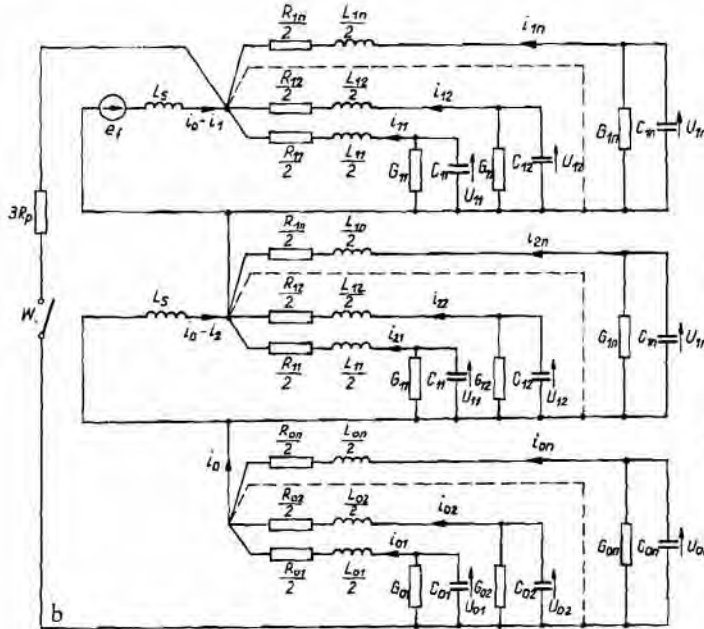
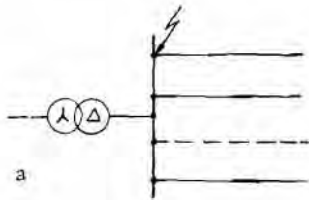


Bild 1. Ersatzschaltbild eines Erdschlußkreises bei Einphasenschluß der Sammelschienen in der Schaltanlage:

a) Schaltplan der Schaltanlage

b) Ersatzschaltbild für symmetrische Komponenten

für den Erdschluß der Sammelschienen in der Schaltanlage aufgestellt. Nach Umformung erhält man für jede k -te Leitung die zweite Ableitung der Mitkomponente der Spannung

$$\frac{d^2 u_{1k}}{dt^2} = - \frac{b_2 L_{11}}{L_{1k} C_{1k}} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{R_{1i} C_{1i}}{L_{1i}} \frac{du_{1i}}{dt} + \frac{2u_{1i}}{L_{1i}} \right) + \frac{\epsilon_{f \max}}{L_s} \sin(\omega t + \psi) \right] - \frac{b_1 L_{11}}{L_{1k} C_{1k}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_{1i} C_{1i}}{L_{1i}} \frac{du_{2i}}{dt} + \frac{2u_{2i}}{L_{1i}} \right) - \frac{R_{1k}}{L_{1k}} \frac{du_{1k}}{dt} - \frac{2u_{1k}}{L_{1k} C_{1k}} - \frac{b_3}{L_{1k} C_{1k}} \times \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{L_{0i}}{L_{0i}} + \frac{6R_p}{R_{0i}} a_1 \right) R_{0i} C_{0i} \frac{du_{0i}}{dt} + \frac{2L_{0i}}{L_{0i}} u_{0i} \right] \quad (1)$$

Gegenkomponente der Spannung

$$\frac{d^2 u_{2k}}{dt^2} = - \frac{b_1 L_{11}}{L_{1k} C_{1k}} \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{R_{1i} C_{1i}}{L_{1i}} \frac{du_{1i}}{dt} + \frac{2u_{1i}}{L_{1i}} \right) + \frac{\epsilon_{f \max}}{L_s} \sin(\omega t + \psi) \right] -$$

$$- \frac{b_2 L_{11}}{L_{1k} C_{1k}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_{1i} C_{1i}}{L_{1i}} \frac{du_{2i}}{dt} + \frac{2u_{2i}}{L_{1i}} \right) - \frac{R_{1k}}{L_{1k}} \frac{du_{2k}}{dt} - \frac{2u_{2k}}{L_{1k} C_{1k}} - \frac{b_3}{L_{1k} C_{1k}} \times \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{L_{0i}}{L_{0i}} + \frac{6R_p}{R_{0i}} a_1 \right) R_{0i} C_{0i} \frac{du_{0i}}{dt} + \frac{2L_{0i}}{L_{0i}} u_{0i} \right] \quad (2)$$

sowie Nullkomponente der Spannung

$$\frac{d^2 u_{0k}}{dt^2} = - \frac{b_3 L_{01}}{L_{0k} C_{0k}} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{R_{1i} C_{1i}}{L_{1i}} \left(\frac{du_{1i}}{dt} + \frac{du_{2i}}{dt} \right) - \frac{R_{0i} C_{0i}}{L_{0i}} \left(2 - \frac{6R_p}{R_{0i}} \frac{L_{0i}}{L_{11}} a_2 \right) \frac{du_{0i}}{dt} + \frac{2}{L_{1i}} (u_{1i} + u_{2i}) - \frac{4u_{0i}}{L_{0i}} \right] + \frac{\epsilon_{f \max}}{L_s} \sin(\omega t + \psi) \right\} - \frac{R_{0k}}{L_{0k}} \frac{du_{0k}}{dt} - \frac{2u_{0k}}{L_{0k} C_{0k}} \quad (3)$$

Die übrigen Beziehungen bestimmen die symmetrischen Komponenten des Stromes:

Mitkomponente

$$i_{1k} = - C_{1k} \frac{du_{1k}}{dt} \quad (4)$$

Gegenkomponente

$$i_{2k} = - C_{1k} \frac{du_{2k}}{dt} \quad (5)$$

sowie Nullkomponente

$$i_{0k} = - C_{0k} \frac{du_{0k}}{dt} \quad (6)$$

Koeffizienten in den Gleichungen (1) bis (3)

$$b_1 = \frac{1}{a_2 a_3} \quad (7)$$

$$b_2 = \frac{1}{a_2 a_3} - \frac{1}{a_2} = b_1 - \frac{1}{a_2} \quad (8)$$

$$b_3 = \frac{1}{a_1 a_3} \quad (9)$$

$$a_1 = L_{01} \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_{0i}} \quad (10)$$

$$a_2 = L_{11} \left(\frac{1}{2L_s} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_{1i}} \right) \quad (11)$$

$$a_3 = \frac{L_{01}}{L_{11}} \cdot \frac{a_2}{a_1} + 2 \quad (12)$$

Jeder Leitung entsprechen 6 Differentialgleichungen, für n Leitungen wird ein Gleichungssystem von $6n$ Gleichungen erhalten.

Nur eine Rechenanlage ermöglicht, die dargestellten Gleichungssysteme zu lösen und es ist schwierig, anhand dieser Systeme verallgemeinerte Folgerungen zu ziehen.

3. Analyse der Berechnungen mit Digitalrechnern

Unter Zugrundelegung der Differentialgleichungen (1) bis (6) wurden diese Berechnungen für Netze mit

Kabelleitungen (mit Strombegrenzungsdrosselspulen und ohne diese Spulen) und mit Freileitungen durchgeführt sowie für Netze, die sowohl Kabelleitungen als auch Freileitungen enthielten.

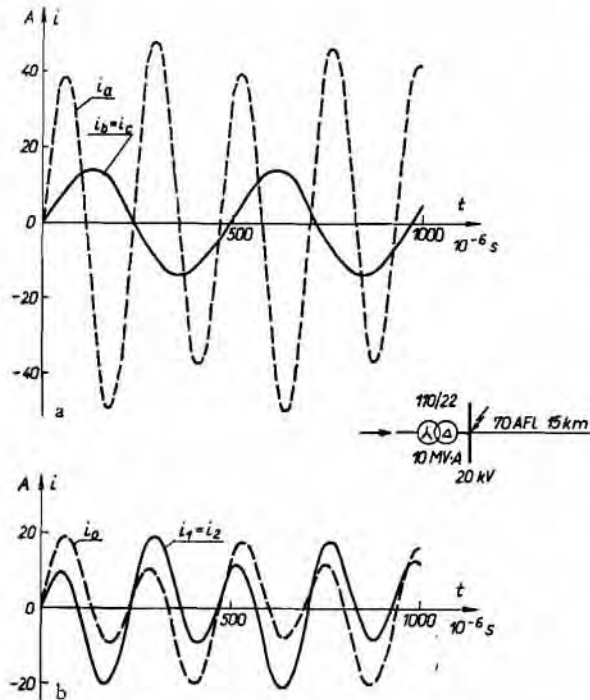


Bild 2. Stromvorgänge bei Erdschluß der 20 kV-Sammelschienen, die mit einer Freileitung von $l = 15$ km verbunden sind

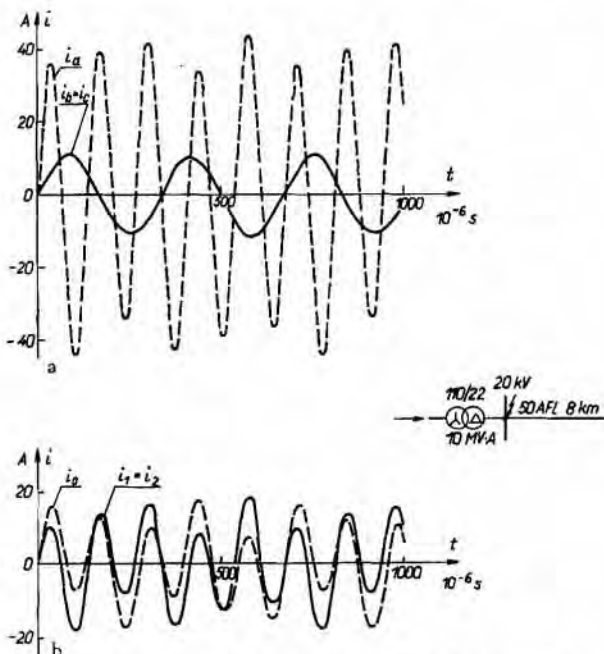


Bild 3. Stromvorgänge bei Erdschluß der 20 kV-Sammelschienen die mit einer Freileitung von $l = 8$ km verbunden sind

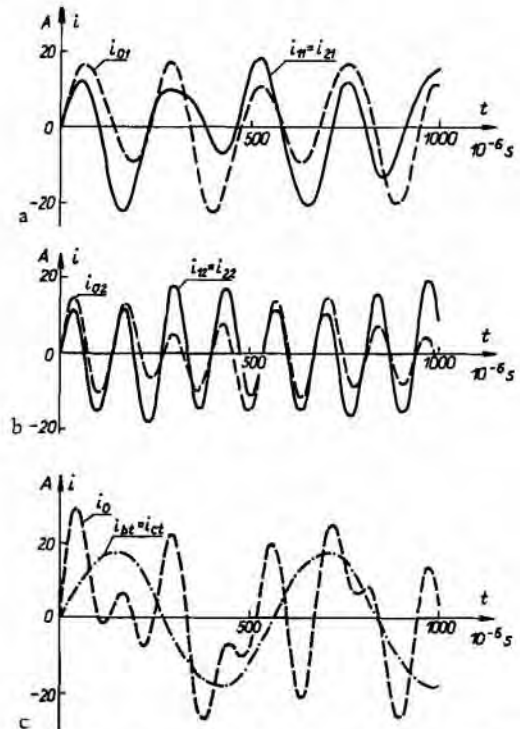
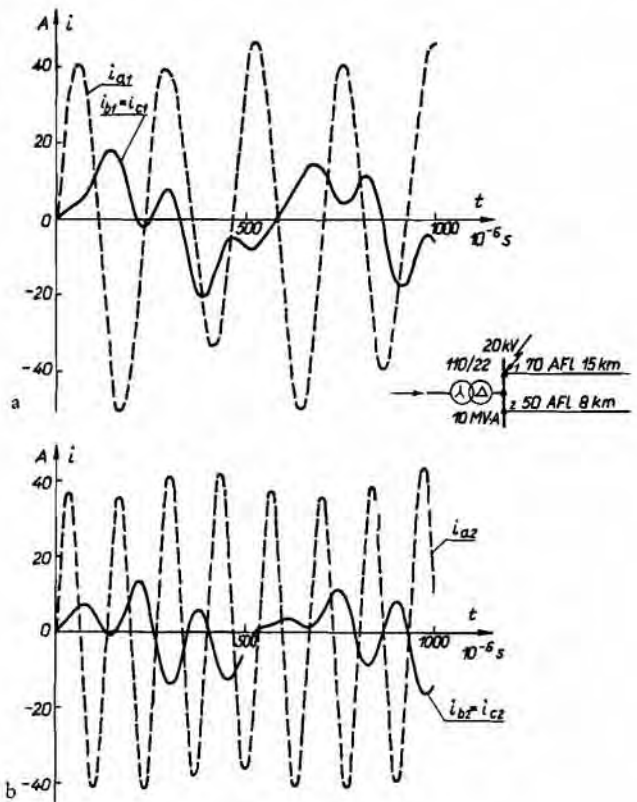


Bild 4. Stromvorgänge bei Erdschlüssen der 20 kV-Sammelschienen, die mit zwei Freileitungen verbunden sind;

a) in der Leitung 1, b) in der Leitung 2, c) im Speisefeld von 20 kV

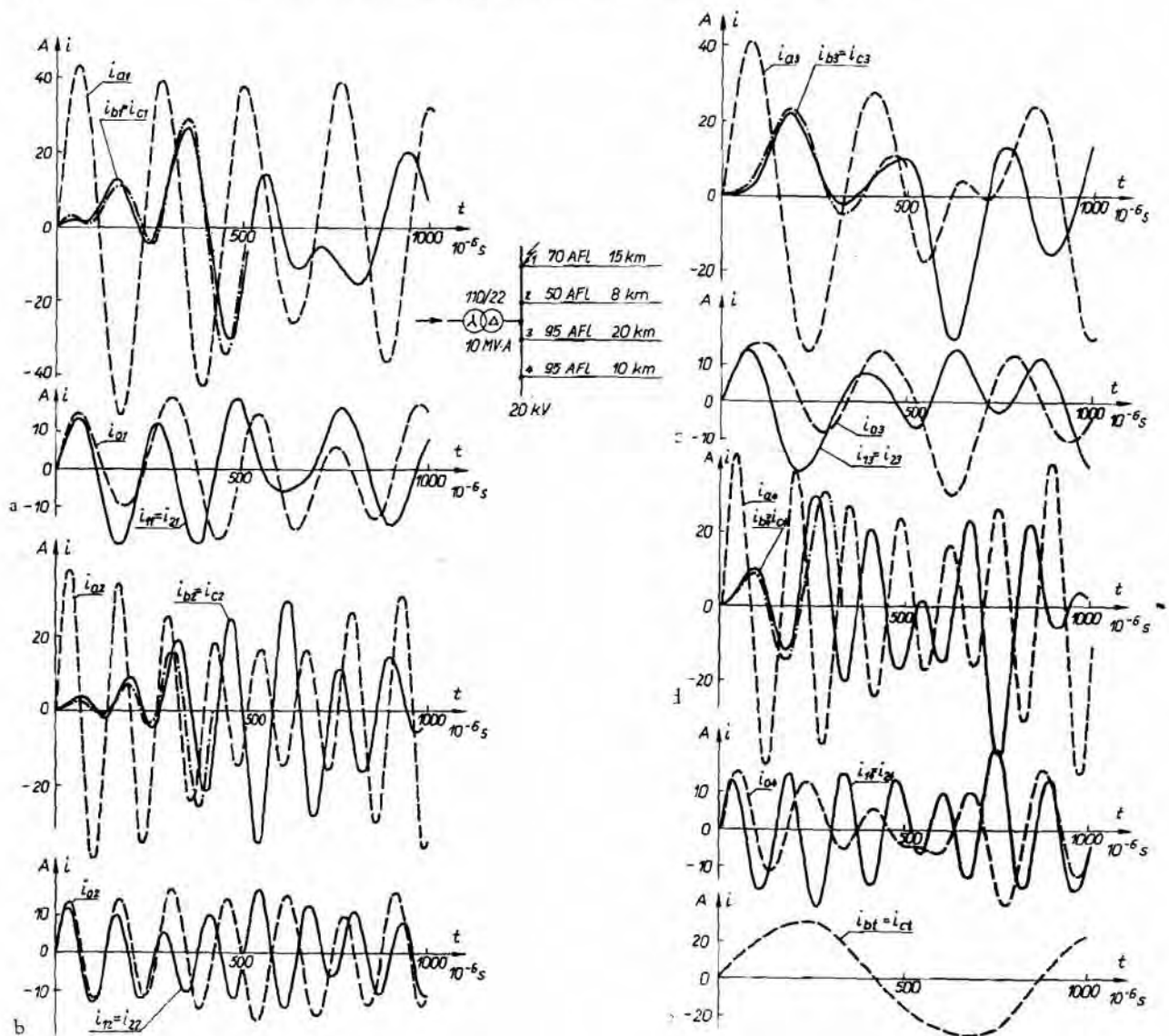


Bild 5. Stromvorgänge bei Erdschluß der 20 kV-Sammelschienen, die mit vier Freileitungen verbunden sind; a, b, c, d) in Leitungen von 1 bis 4 e) im Speisefeld von 20 kV

— · — · — Ströme in gesunden Phasen, berechnet mittels vereinfachter Methode

Bild 2 veranschaulicht Stromdurchgänge während der erdgeschlossenen Phase A der 20-kV-Sammelschienen, die mit einer Freileitung von 15 km Länge verbunden sind. In den gesunden Phasen der Leitungen ist ausschließlich eine freie Nachladungskomponente dieser Phasen zu beobachten, in der erdgeschlossenen Phase dagegen ein Vorgang, der die Summe der freien Entladungskomponente dieser Phase und der Nachladungskomponente der gesunden Phasen darstellt.

Bild 3 zeigt die Vorgänge für den Erdschluß dieser Schienen, die aber mit einer 8 km langen Freileitung verbunden sind. Bild 4 enthält die berechneten Vorgänge für den Erdschluß der Schienen, wobei diese

mit den beiden oben genannten Leitungen verbunden sind. Man kann feststellen, daß die Frequenzen der Entladungskomponenten in der erdgeschlossenen Phase praktisch unverändert bleiben im Gegensatz zu jener Situation, wo die Leitungen einzeln an die Schienen angeschlossen waren. Es treten nur Unterschiede der Amplituden auf, was durch die Änderung der Frequenz und der Amplituden der Nachladungskomponenten sowie durch die Ausgleichskomponenten zwischen beiden Leitungen zu erklären ist. Die freie Nachladungskomponente kann ermittelt werden, indem der Strom in den Transformatorenwicklungen bestimmt wird, da nur dort diese Komponente auftritt.

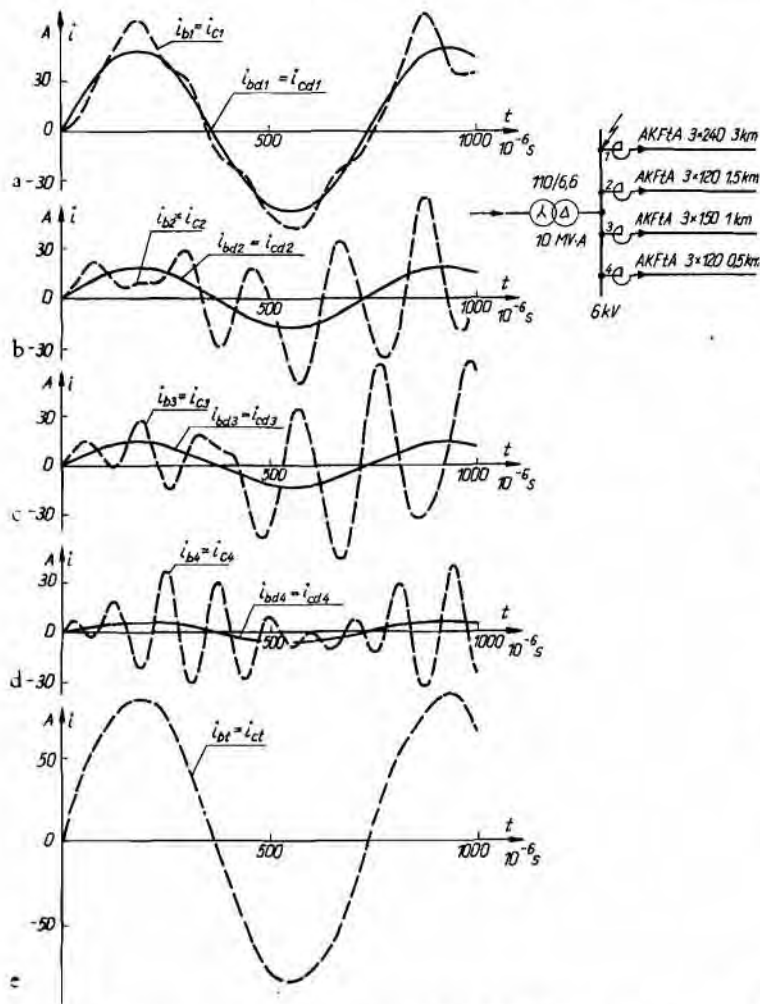


Bild 6. Stromvorgänge bei Erdschluß der 6 kV-Sammelschienen, die mit vier Kabelleitungen verbunden sind;
a, b, c, d) in Leitungen von 1 bis 4,
e) im Speisefeld von 6 kV

In den Strömen der nicht fehlerbehafteten Phasen beider Leitungen dagegen sind außer der Nachladungskomponente freie Ausgleichskomponenten zu sehen. Die Frequenzen der Nachladungskomponenten der beiden Leitungen sind dabei gleich oder unterscheiden sich nur unbedeutend.

Weitere Vorgänge (Bild 5) wurden für den Erdschluß derselben Sammelschienen errechnet, wobei an diese zusätzlich zwei Leitungen mit einer Länge von 20 km und 10 km angeschlossen wurden. Das Anschließen dieser Leitungen verursacht keine merkbare Beeinflussung der Frequenzen der Entladungskomponenten. Die Kennlinie der Nachladungskomponente in den Wicklungen des Transformators weicht nur wenig von der Sinusform ab, die Frequenz dieser Komponente ist im Vergleich zum System mit zwei Leitungen geringer geworden. In den Strömen der

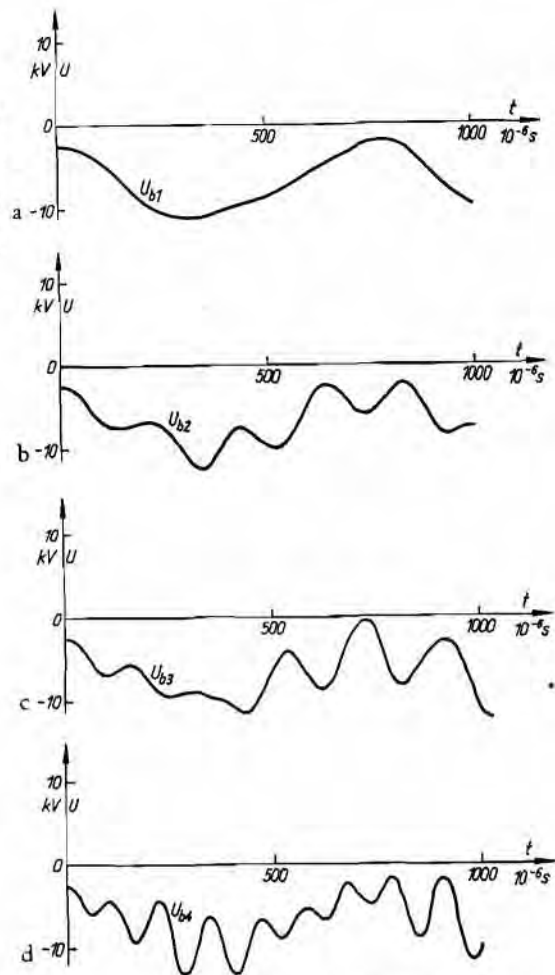


Bild 7. Spannungsvorgänge bei Erdschluß der 6 kV-Sammelschienen, die mit vier Kabelleitungen verbunden sind (Bild 6)
a, b, c, d) in Leitungen von 1 bis 4

gesunden Phasen aller Leitungen sind freie Ausgleichskomponenten zu sehen, die manchmal ziemlich hohe Werte erreichen. Auch hier bestätigt sich, daß die Nachladungskomponenten in allen Leitungen dieselbe oder angenähert gleiche Frequenzen haben. In Bild 5 wurden ebenfalls Stromvorgänge von gesunden Phasen dargestellt, die mittels einer vereinfachten Methode berechnet wurden (vgl. 4).

Ähnliche Folgerungen werden bei der Analyse der Vorgänge für den Erdschluß der Sammelschienen der 6-kV-Schaltanlage erhalten, an die vier Kabelleitungen über Strombegrenzungsdrösselspulen angeschlossen sind (Bild 6 u. 7). In den Strömen der gesunden Phasen der ersten Leitung dominiert die freie Nachladungskomponente. Die Unterschiede der Kurvenform dieser Ströme sowie der Kurve für die Nachladungskomponente, die durch die Ströme in den

Wicklungen der gesunden Phasen im Transformator festgelegt werden, haben ihre Ursache in dem Auftreten der freien Ausgleichskomponenten. Diese letzteren sind deutlich in den Strömen der gesunden Phasen der übrigen Leitungen zu sehen, wo auch der Anteil der Nachladungskomponenten ersichtlich ist. Die Kurven der Nachladungskomponenten sind der Sinuslinie sehr ähnlich.

4. Analyse der Vorgänge mittels vereinfachter Methode

4.1 Arten der freien Komponenten des Erdschlußstromes

Eine gründliche Analyse der Berechnungsergebnisse sowie der Untersuchungen bei natürlichen Verhältnissen ermöglicht im erdgeschlossenen transienten Vorgang folgende freie Komponenten höherer Frequenz zu unterscheiden:

a) Freie Entladungskomponenten, verursacht durch den Spannungsanstieg an den Kapazitäten C_{1k} und C_{0k} in den Teilen des Ersatzschaltbildes für die symmetrische Gegenkomponente und die Nullkomponente (Bild 1); sie treten also im Stromkreis $\frac{1}{2} L_{1k}$, C_{1k} (für die Mitkomponente), $\frac{1}{2} L_{1k}$, C_{1k} (für die Gegenkomponente), $\frac{1}{2} L_{0k}$, C_{0k} sowie an der Erdschlußstelle auf. Im Dreiphasensystem sind sie mit der Entladung jener Phase verknüpft, in der der Erdschluß auftrat, sowie mit der Vor-Nachladung der nicht fehlerbehafteten Phasen.

b) Die freien Nachladungskomponenten, verursacht durch den weiteren Spannungsanstieg an den Kapazitäten C_{0k} , die in den Stromkreisen mit den Induktivitäten L_s und den Kapazitäten C_{1k} , C_{0k} fließen. Der Spannungsanstieg an C_{0k} wird vom Spannungsanstieg an den Kapazitäten C_{1k} (für die Mitkomponente) sowie vom Spannungsabfall an C_{1k} (für die Gegenkomponente) begleitet. Im Dreiphasensystem verursacht dieser Verlauf einen weiteren Spannungsanstieg an den gesunden Phasen gegenüber Erde.

c) Die freien Ausgleichskomponenten zwischen den Zweigen einzelner Leitungen im Ersatzschaltbild für alle symmetrischen Komponenten.

4.2 Entladungskomponenten

Sie treten in Stromkreisen auf, die den einzelnen Leitungen entsprechen. Ersatzparameter eines solchen Kreises für den Erdschluß der Sammelschienen (Bild 8) sind:

$$L_k = L_{1k} + \frac{L_{0k}}{2}, \quad (13)$$

$$C_k = \frac{C_{1k} C_{0k}}{C_{1k} + 2C_{0k}}. \quad (14)$$

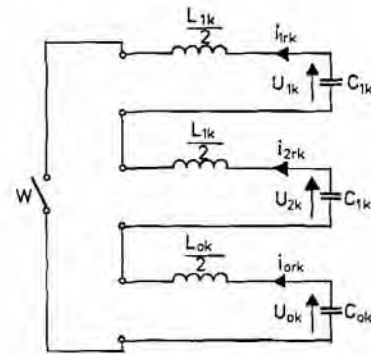


Bild 8. Ersatzschaltbild des Stromkreises der Entladungskomponente für den Erdschluß der Sammelschienen

Bei sinusförmiger Spannung der Stromquelle (Bild 1), die durch die Beziehung

$$e_t = e_{t \max} \sin(\omega t + \varphi) \quad (15)$$

ausgedrückt wird, beträgt die Spannung u_{10} an den Kapazitäten C_{1k} zur Zeit $t = 0$

$$u_{10} \approx e_{t \max} \sin \varphi. \quad (16)$$

Der Entladungsstrom in der k -ten Leitung wird durch die Beziehung

$$i_{rk} = \frac{u_{10}}{\omega_{rk} L_k} \sin \omega_{rk} t = i_{rk \max} \sin \omega_{rk} t \quad (17)$$

ausgedrückt, worin

$$\omega_{rk} = \frac{1}{\sqrt{L_k C_k}}. \quad (18)$$

Nach Abklingen der Entladungskomponenten tritt eine Veränderung der Spannungen an den einzelnen Kapazitäten auf, die aus der Ladungsbilanz bestimmt werden können:

$$u_{1k} = u_{10} \frac{C_{1k} + C_{0k}}{C_{1k} + 2C_{0k}}, \quad (19)$$

$$u_{2k} = -u_{10} \frac{C_{0k}}{C_{1k} + 2C_{0k}}, \quad (20)$$

$$u_{0k} = -u_{10} \frac{C_{1k}}{C_{1k} + 2C_{0k}}. \quad (21)$$

4.3 Nachladungskomponenten

Diese Komponenten können anhand des Ersatzschaltbildes Bild 9 bestimmt werden, in dem die Induktivitäten der einzelnen Leitungen nicht berücksichtigt wurden. Eine derartige Vereinfachung verursacht um so kleinere Fehler, je mehr Leitungen im Netz vorhanden sind. Die auf diese Weise bestimmten Nachladungskomponenten haben die gleiche Frequenz für sämtliche Leitungen.

Der Nachladestrom im Stromkreis für die Nullkomponente, der mit Hilfe der Operatoren — Rech-

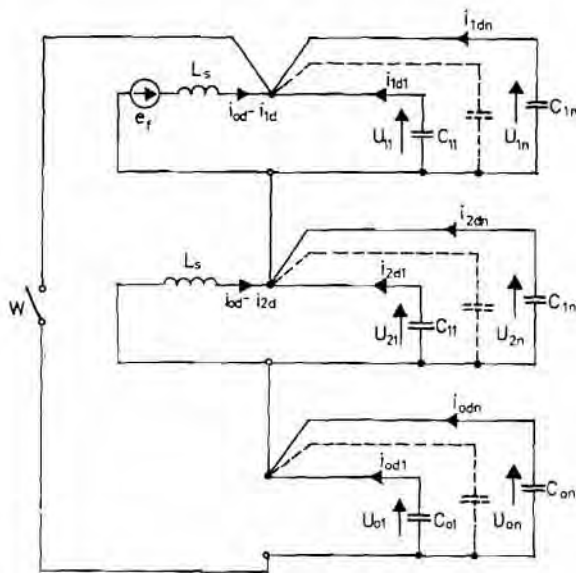


Bild 9. Ersatzschaltbild der Stromkreise der Nachladungskomponenten für den Erdschluß der Sammelschienen

nung ermittelt wurde, ist:

$$i_{0d} = \frac{e_{f \max}}{X_0} \left[\left(1 - \frac{X_0}{X_{C0}} k_{Ci} \right) \frac{\omega_d}{\omega} \sin \psi \sin \omega_d t - \cos \psi \cos \omega_d t \right] \quad (22)$$

worin

$$\omega_d = \frac{1}{\sqrt{L_s(C_2 + 2C_0)}}, \quad (23)$$

$$X_0 = \frac{1 - \omega^2 L_s (C_2 + 2C_0)}{\omega C_0}, \quad (24)$$

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega C_0}, \quad (25)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^n C_{1i}, \quad (26)$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^n C_{0i}, \quad (27)$$

$$k_{Ci} = \sum_{i=1}^n \frac{2C_{0i}}{C_{1i} + 2C_{0i}} \frac{C_{0i}}{C_0}. \quad (28)$$

Für

$$X_0 \approx X_{C0} = \frac{1}{\omega C_0} \quad (29)$$

erhält man

$$i_{0d} = e_{f \max} \omega C_0 \left(k_{Ci} \frac{\omega_d}{\omega} \sin \psi \sin \omega_d t - \cos \psi \cos \omega_d t \right). \quad (30)$$

Die Nullkomponenten der Nachladeströme in einzelnen Leitungen sind proportional zur Kapazität dieser Leitungen:

$$i_{0dk} = \frac{C_{0k}}{C_0} i_{0d}. \quad (31)$$

Im Ersatzschaltbild für die symmetrischen Mit- und Gegenkomponenten tritt der Nachladestrom auf

$$i_{1d} = i_{2d} = -i_{0d} \frac{C_1}{2C_0}. \quad (32)$$

In den Stromkreisen für die symmetrische Mitkomponente tritt außerdem noch der Nachladestrom auf, der mit dem Spannungsanstieg an den Kapazitäten C_{1k} verbunden ist und in den Kreisen Induktivität L_s – Kapazität C_{1k} fließt:

$$i_{11} = e_{f \max} \frac{C_1}{2} \cos \psi \cos \omega_1 t \quad (33)$$

wo

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_1}}. \quad (34)$$

Der Nachladestrom mit der Kreisfrequenz ω_1 in Ersatzschaltbild für die symmetrische Gegenkomponente:

$$i_{21} = -i_{11} = -e_{f \max} \omega_1 \frac{C_1}{2} \cos \psi \cos \omega_1 t. \quad (35)$$

In der fehlerbehafteten Phase A der k -ten Leitung fließt ausschließlich ein Nachladestrom der Kreisfrequenz ω_d

$$i_{adk} = i_{0d} \frac{C_{0k} - C_{1k}}{C_0}, \quad (36)$$

da der Strom mit Kreisfrequenz ω_1

$$i_{a1k} = 0 \quad (37)$$

In den gesunden Phasen B und C ist der Strom der Kreisfrequenz ω_d

$$i_{bdk} = i_{cdk} = i_{0d} \frac{C_{1k1} + 2C_{0k}}{2C_0} \quad (38)$$

der Strom mit Kreisfrequenz ω_1 ist dagegen

$$i_{b1k} = -\frac{1}{2} (i_{11k} + i_{21k}) = 0. \quad (39)$$

4.4 Ausgleichskomponenten

Entlade- und Nachladeströme rufen in den einzelnen Zweigen unterschiedliche Spannungsabfälle hervor, wodurch Ausgleichsströme entstehen. Die Verteilung der Nachladeströme auf einzelne Zweige ergibt sich proportional zur Kapazität dieser Zweige (31). Die Spannungen mit der Kreisfrequenz ω_d an den Zweigen sind also gleich. An den Induktivitäten treten zwischen den Spannungen Unterschiede auf. Diese Spannungswerte sind jedoch sehr gering und nehmen mit der Ausdehnung des Netzes ab, da die Kreisfrequenz absinkt. Die Unterschiede zwischen diesen Spannungen sind ebenfalls gering und die Werte der Ausgleichsströme, die durch die Nachladungskomponenten hervorgerufen werden, können

vernachlässigt werden. In den weiteren Betrachtungen werden nur Ausgleichsströme berücksichtigt, die als Folge des Nichtausgleichs der Spannungen der Entladungskomponenten anzusehen sind.

Der gesamte Ausgleichsstrom im Ersatzschaltbild für die Nullkomponente der k -ten Leitung beträgt:

$$i_{0wk} = i_{0kk} + i_{0\Sigma k} \quad (40)$$

wobei

$$i_{0kk} = i_{rk \max} \frac{X_{0kk}}{X_{0kk} + X_{0k\Sigma}} \left(\frac{\omega_{0wk}}{\omega_{rk}} \sin \omega_{0wk} t - \sin \omega_{rk} t \right) \quad (41)$$

jener Ausgleichsstrom ist, der durch die Spannung der k -ten Leitung bewirkt wird;

$$X_{0kk} = \omega_{rk} \frac{L_{0k}}{2} - \frac{1}{\omega_{rk} C_{0k}}, \quad (42)$$

$$\frac{1}{X_{0k\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{X_{0ki}} - \frac{1}{X_{0kk}}, \quad (43)$$

$$\omega_{0wk} = \frac{1}{\sqrt{L_{0zk} C_{0zk}}}, \quad (44)$$

Die Induktivität L_{0zk} sowie die Kapazität C_{0zk} kann mit Hilfe eines Ersatzschaltbildes (Bild 10) bestimmt werden, bei denen die Induktivitäten (a), die Kapazitäten (b) oder die Induktivitäten und Kapazitäten (c) sämtlicher Leitungen unberücksichtigt bleiben, mit Ausnahme der k -ten Leitung, also jener, die den zu berechnenden Ausgleichsstrom bewirkt.

Die Ausgleichsströme aller übrigen Zweige mit Ausnahme der k -ten gehen aus der Beziehung

$$i_{0\Sigma k} = \sum_{m=1}^{k-1} i_{0mk} + \sum_{m=k+1}^n i_{0mk} \quad (45)$$

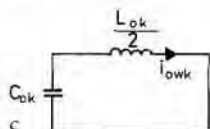
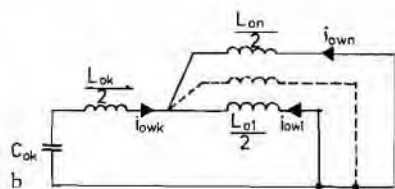
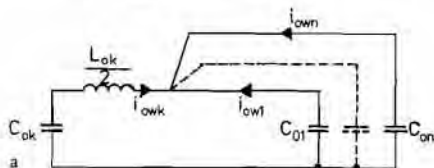


Bild 10. Vereinfachte Ersatzschaltbilder zur Berechnung der freien Ausgleichskomponenten. Die Induktivität (a), die Kapazität (b) sowie Induktivität und Kapazität (c) der Leitung werden nicht berücksichtigt

hervor, in der der durch die Spannung des m -ten Zweiges entstandene Ausgleichsstrom

$$i_{0mk} = i_{rm \max} \frac{X_{0mm}}{X_{0mm} + X_{0m\Sigma}} \frac{X_{0m\Sigma}}{X_{0mk}} \times \left(\sin \omega_{rm} t - \frac{\omega_{0wm}}{\omega_{rm}} \sin \omega_{0wm} t \right), \quad (46)$$

X_{0mm} wird ähnlich wie X_{0kk} (42) bestimmt,

$X_{0m\Sigma}$ wie $X_{0k\Sigma}$ (43) und ω_{0wm} wie ω_{0wk} (44).

Der gesamte Ausgleichsstrom in den Ersatzschaltbildern für die Mit- und Gegenkomponenten der k -ten Leitung ist

$$i_{1wk} = i_{1kk} + i_{1\Sigma k} \quad (47)$$

wo

$$i_{1kk} = i_{rk \max} \frac{X_{1kk}}{X_{1kk} + X_{1k\Sigma}} \left(\frac{\omega_{1wk}}{\omega_{rk}} \sin \omega_{1wk} t - \sin \omega_{rk} t \right) \quad (48)$$

der durch die Spannung des k -ten Zweiges bewirkte Ausgleichsstrom ist:

$$X_{1kk} = \omega_{rk} \frac{L_{1k}}{2} - \frac{1}{\omega_{rk} C_{1k}}, \quad (49)$$

$$\frac{1}{X_{1k\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{X_{1ki}} - \frac{1}{X_{1kk}}, \quad (50)$$

$$\omega_{1wk} = \frac{1}{\sqrt{L_{1zk} C_{1zk}}}. \quad (51)$$

Die Parameter L_{1zk} und C_{1zk} werden ähnlich wie für die Nullkomponenten bestimmt.

Die Ausgleichsströme aller übrigen Zweige außer dem k -ten sind

$$i_{1\Sigma k} = \sum_{m=1}^{k-1} i_{1mk} + \sum_{m=k+1}^n i_{1mk} \quad (52)$$

mit dem durch die Spannung des m -ten Zweiges hervorgerufenen Ausgleichsstrom

$$i_{1mk} = i_{rm \max} \frac{X_{1mm}}{X_{1mm} + X_{1m\Sigma}} \frac{X_{1m\Sigma}}{X_{1mk}} \times \left(\sin \omega_{rm} t - \frac{\omega_{1wm}}{\omega_{rm}} \sin \omega_{1wm} t \right). \quad (53)$$

Die Ausgleichskomponenten können wesentliche Werte erreichen, wenn die Reaktanzen $(X_{0kk} + X_{0k\Sigma})$ oder $(X_{0mm} + X_{0m\Sigma})$ in den Ausdrücken (41), (46) oder auch $(X_{1kk} + X_{1k\Sigma})$ bzw. $(X_{1mm} + X_{1m\Sigma})$ in den Ausdrücken (48), (53) kleine Werte im Vergleich zu den Reaktanzen in den Zählern der Brüche dieser Ausdrücke erreichen. Wenn

$$L_{0k} = L_{1k} \quad \text{und} \quad C_{0k} = C_{1k}$$

gilt, dann ist

$$X_{0kk} = X_{1kk} = 0$$

und somit

$$i_{0kk} = i_{1kk} = 0.$$

5. Transiente Vorgänge bei intermittierenden Erdschlüssen

Mit der Löschung des Erdschlußlichtbogens treten an den Kapazitäten für die Gegen- und Mitkomponenten Spannungen auf. An den Kapazitäten für die Mitkomponente können die Spannungen etwas höher sein als während der Zündung des Lichtbogens. Die Spannungswerte hängen vom Zeitpunkt der Löschung des Lichtbogens ab. Nach der Löschung und der erneuten Zündung steigen die Spannungen an den Kapazitäten für die Mitkomponente und sinken an den Kapazitäten für die Gegenkomponente. Die Entladung in den Stromkreisen für die Nullkomponente kann durch die Ableitung des Netzes erfolgen und in Netzen mit Kompensation über Löschspulen. Die Spannungen u_{0k} an den Kapazitäten C_0 im Augenblick einer wiederholten Zündung des Lichtbogens hängen von dem Zeitpunkt ab, in dem die Zündung erfolgte und in Netzen mit Kompensation auch vom Kompensationsgrad.

Der Entladungsstrom nach wiederholter Zündung des Lichtbogens ist

$$i_{zk} = \frac{e_{1k} - u_{0k}}{\omega_k L_k} \sin \omega_k t. \quad (54)$$

Als Folge dieses Stromdurchgangs ergeben sich an den einzelnen Kapazitäten folgende Spannungen

$$u_{1k} = u_{10} \frac{C_{1k} - C_{0k}}{C_{1k} + 2C_{0k}} - u_{0k} \frac{C_{0k}}{C_{1k} + 2C_{0k}}, \quad (55)$$

$$u_{2k} = - (u_{10} - u_{0k}) \frac{C_{0k}}{C_{1k} + 2C_{0k}}, \quad (56)$$

$$u_{0k} = - u_{10} \frac{C_{1k}}{C_{1k} + 2C_{0k}} + u_{0k} \frac{2C_{0k}}{C_{1k} + 2C_{0k}}. \quad (57)$$

Der Nachladestrom in den Stromkreisen für die symmetrische Nullkomponente wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$i_{0k} = e_{f \max} \omega C_0 \left[\left(\sin \psi - \frac{u_{0k}}{e_{f \max}} \right) \times \right. \\ \left. + \frac{e_{f \max}}{\omega C_0} \sin \omega_d t - \cos \psi \cos \omega_d t \right]. \quad (58)$$

Die Abhängigkeiten (41), (45), (46), (48), (52) für die Ausgleichskomponenten verändern sich nicht. Es treten hier nur andere Werte $i_{rm \max}$ auf, die aus (54) gewonnen wurden.

6. Phasenströme und Phasenspannungen

Die Beziehungen für die freien Komponenten der Erdschlußströme in den Stromkreisen für einzelne symmetrische Komponenten geben die Grundlage

für die Berechnung der transienten Phasenstrom- und Phasenspannungsvorgänge.

Die Übergangskomponenten der Phasenströme der k -ten Leitung sind

$$i_{apk} = 3i_{rk} + \frac{C_{0k} - C_{1k}}{C_{0k}} i_{0dk} + 2i_{1wk} + i_{0wk}, \quad (59)$$

$$i_{bpk} = i_{cpk} = \left(1 + \frac{C_{1k}}{2C_{0k}} \right) i_{0dk} + i_{0wk} - i_{1wk}. \quad (60)$$

Die Übergangskomponenten der Phasenspannungen dieser Leitung sind

$$u_{apk} = - \left(\frac{2}{C_{1k}} + \frac{1}{C_{0k}} \right) \int_0^t i_{rk} dt - \\ - \frac{2}{C_{1k}} \int_0^t i_{1wk} dt - \frac{1}{C_{0k}} \int_0^t i_{0wk} dt, \quad (61)$$

$$u_{bpk} = u_{cpk} = \left(\frac{1}{C_{1k}} - \frac{1}{C_{0k}} \right) \int_0^t i_{rk} dt - \frac{3}{2C_{0k}} \int_0^t i_{0dk} dt - \\ - \frac{1}{C_{0k}} \int_0^t i_{0wk} dt + \frac{1}{C_{1k}} \int_0^t i_{1wk} dt. \quad (62)$$

7. Schlußfolgerungen

1. Die in der Literatur angegebenen Abhängigkeiten über transiente Vorgänge bei Erdschlüssen in Mittelspannungsnetzen erfassen nicht alle Komponenten dieses Vorganges. Es fehlt auch an Abhängigkeiten über die Phasenströme und Phasenspannungen im transienten Vorgang. Die hier vorgeführten vereinfachten Beziehungen zur Berechnung der freien Komponenten von Erdschlußströmen führen zu genügend genauen Ergebnissen insbesondere für das Anfangsstadium des transienten Vorganges.

2. In den transienten Vorgängen der Erdschlüsse wurden in der Arbeit folgende freie Komponenten der höheren Frequenz unterschieden:

- Entladungskomponenten der fehlerbehafteten Phase,
- Nachladungskomponenten der gesunden Phasen,
- Ausgleichskomponenten zwischen einzelnen Leitungen im Netz.

3. Die freien Ausgleichskomponenten, die bisher in der Literatur nicht analysiert wurden, können beträchtliche Werte erreichen, die u. a. von der Konfiguration des Netzes sowie von der Ortsbestimmung des Erdschlusses abhängen.

Literatur

1. Baatz, H.: Überspannungen in Energieversorgungsnetzen. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1956
2. Gegner, L.: Elektronisches Erdschlußrichtungsrelais TREER zur selektiven Erdschlußfassung. *Elektrie* (1967) 50—52
3. Jakubowski, J. L.: Grundlagen zur Theorie der Überspannungen in Energieversorgungssystemen. Warschau: PWN 1968 (polnisch)
4. Łobos, T.: Freie Komponenten höherer Frequenz des Erdschlußstroms in Netzen mit kleinem Erdschlußstrom (polnisch). *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej* 1972, Nr. 17, 72—90
5. Łobos, T.: Die Nutzung der Ausgleichsvorgänge in Erdschlußrelais für Mittelspannungsnetze (polnisch), *Prace Naukowe Instytutu Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej* 1974, Nr. 16, 119—130
6. Pundt, H.: Untersuchung der Ausgleichsvorgänge bei Erdschluß in Energieversorgungsnetzen, *Energietechnik* 15 (1965) 469—477
7. Wilhelm, R., Waters, M.: Neutral grounding in high-voltage transmission. Elsevier Publishing Company 1956

Eingegangen am 9. Mai 1975

Dr.-Ing. Tadeusz Łobos
Instytut Energoelektryki
Politechniki Wrocławskiej
pl. Grunwaldzki 13
50-377 Wrocław
Polen